الفصل الثالث

الخلايا الشمسية الفولطاضوئيّة

3-1 مقدمة عن الخلايا الشمسية

3-2 المبادئ الأساسية لعمل الخلايا الشمسية

3-3 الخصائص الكهربائية للخلايا والألواح الشمسية السلكونية

3-4 بعض أنواع الخلايا الشمسية الفولطاضوئيّة
- الخلايا السلكونية احادية البلورية
- الخلايا السلكونية الشريطة
- الخلايا السلكونية متعددة البلورية
- خلايا الغاليوم ارسنايد

3-5 الخلايا ذات الأغشية الرقيقة
- الخلايا السلكونية العشوائية
- خلايا الكوبر انديوم ديسلنايد
- خلايا الكادميوم تليرايد

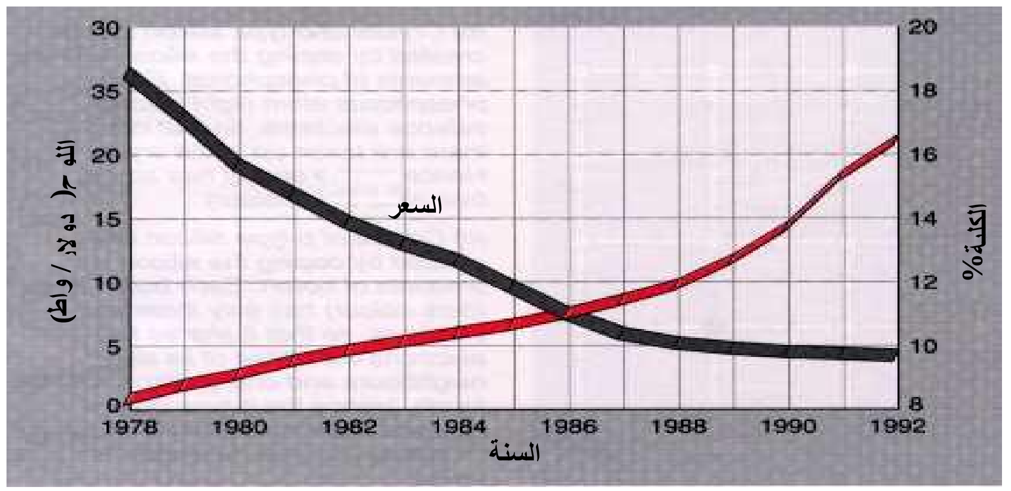
3-6 منظومات الخلايا الفولطاضوئيّة المركزة

3-7 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئيّة
- تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية
- تطبيقات الخلايا الفولطاضوئيّة في بعض البلدان النامية
- استخدام المنظومات الفولطاضوئيّة للربط مع الشبكة الكهربائية

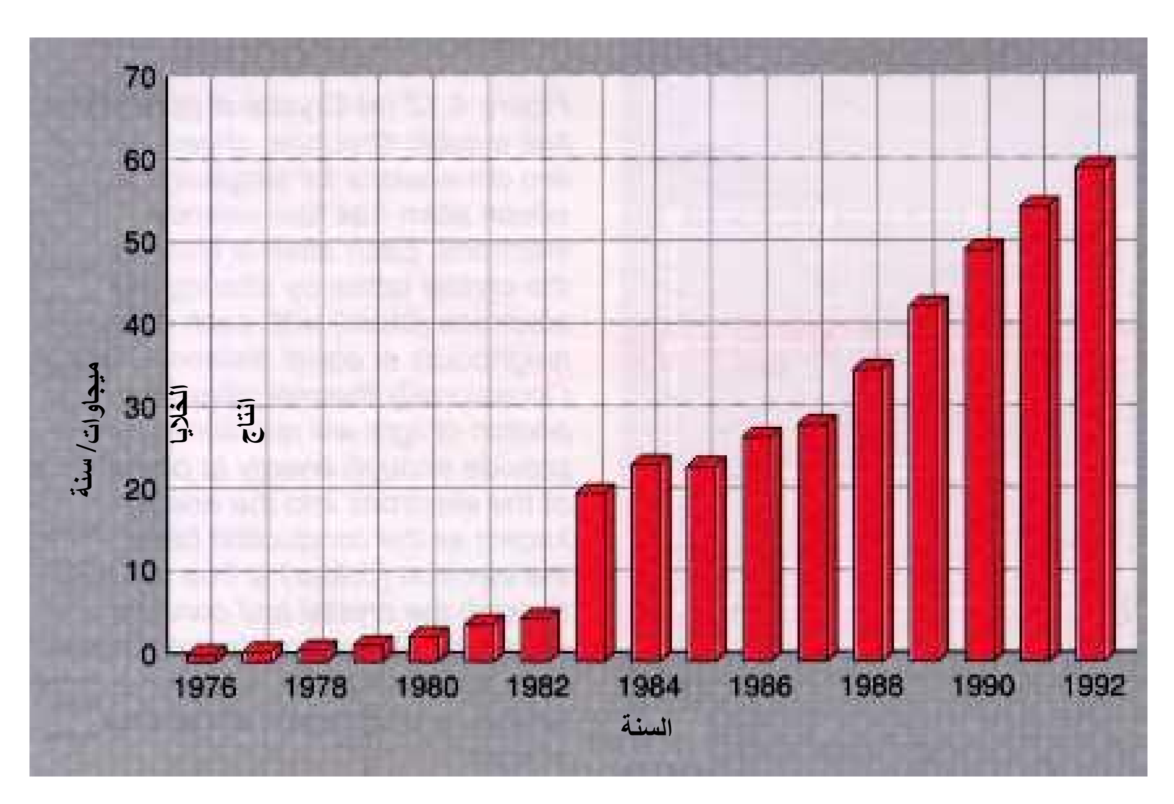
3-8 استخدام الخلايا الشمسية في الفضاء

1-3 مقدمة عن الخلايا الشمسية

إن تحويل أشعة الشمس المباشرة إلى طاقة كهربائية هو أحد المنجزات العلمية الكبرى في القرن العشرين والألفية الثانية ، وهو أفضل التقنيات المستخدمة حالياً في مجال الطاقة المتجددة . لقد بدأت هذه التقنية منذ عقود عديدة لكنها دخلت مرحلة الاستغلال الفعلي عند استخدامها في برامج الفضاء في نهاية الخمسينات من هذا القرن . ولكن العائق في استخدامها على نطاق واسع ومن قِبل عموم الناس هو كلفتها العالية . ولقد انخفض سعر الخلايا الشمسية (Photovoltaic Cells) مئات المرات في الوقت الحاضر عما كان عليه في بداية الستينات ، ولكنها لا تزال مكلفة نسبياً إلى حد الآن . والحقيقة هي عدم وجود أية صعوبات تقنية تمنع توسيع انتشار هذه المنظومات . فمدى انتشار استخدامها يعتمد على كلفة الإنتاج وزيادة الكفاءة . وخلال الأعوام المنصرمة حدث تقدم واسع في إنتاج الخلايا بكلفة معقولة ، وازدادت كفاءتها إلى أن وصلت حوالي 30% في الظروف المخبرية . ويبين الشكل (3-1) تناقص سعر إنتاج الخلايا وزيادة كفاءتها منذ نهاية السبعينات وحتى بداية التسعينات . وعلى الرغم من الكلفة العالية للطاقة الكهربائية المنتجة من الطاقة الشمسية عند مقارنتها بأسعار إنتاج الطاقة الكهربائية بالطرق التقليدية فإن سوق الخلايا الشمسية ما فتئ ينمو . وقد نصبت عشرات الآلاف من المنظومات في تطبيقات مختلفة كالإنارة والاتصالات ، وضخ المياه ، وشحن البطاريات ، وتشغيل ثلاجات الأدوية وغيرها من الاستخدامات . ويبين الشكل (3-2) زيادة كمية الإنتاج السنوي للأسطح الشمسية الفولطاضوئية منذ عام 1976 ولغاية 1992 . ومعظم تقنيات الخلايا الشمسية يتم تطبيقها في المناطق النائية حيث تبقى الخلايا الشمسية هي الأفضل استخداماً وذلك لسهولة نصبها وعدم حاجتها إلى صيانة مستمرة وعدم مساهمتها في تلوث البيئة .



شكل (3-1): تناقص سعر إنتاج الخلايا الشمسية وزيادة كفاءتها للفترة من 1978 ولغاية 1992



شكل (3-2): الإنتاج السنوي للأسطح الشمسية الفولطاضوئيّة للفترة من عام 1976 ولغاية عام 1992

المـادة الأوليـة التـي تـصنع منهـا الخلايـا هـي الـسليكون ، وهـو متـوفر دائمـاً فـي الطبيعـة . وسينمو سوق الخلايا الشمسية بصورة كبيرة عندما تصل كلفة إنتاج الطاقـة الكهربائيـة منهـا إلى كلفة مثيلتها الناتجة من المصادر الأخرى . وقد تـم إلـى حد الآن انخفـاض سـعر اللـوح الشمسي الفولطاضـوئي بالنسبة للـواط من 4.5 دولار إلـى 2.5 دولار (لاحظ أنـه فـي الـدول العربية تكون كلفة الواط بعد تركيب كافـة الأنظمـة المصاحبة من 8 إلـى 10 دولار) . وإذا اسـتمر هذا النقـصان فستـصبح منظومـات الطاقـة الشمـسية منافـسة لـسعر مولـدات الـديزل، وعندمــا يصــل سعر اللوح إلى 1.5 دولار للواط أو سعر منظومة الخلايا الشمسية بســعر 2.5 إلى 3.0 دولار لكل واط فإنه بـذلك يمكن إنتـاج طاقـة كهربائيـة بكلفة 12 سنت أمريكـي لكل كيلوواط ساعة ، علماً بأن الهدف الحالي المحدد هو إنتاج كهربـاء بكلفـة 6 إلـى 9 سنت لكل كيلوواط – ساعة ويتطلب ذلك فترة زمنية طويلة .

2-3 المبادئ الأساسية لعمل الخلايا الشمسية

تتكون الخليـة الشمسية من خط اتصال يفصل بين طبقتين خفيفتين من مـادة شبه موصـلة إحداهما موجبة وتدعى (P) ، بينما الأخرى سالبة وتدعى نوع (N) . وللسهولة سنعتبر بـأن المادة شبه الموصلة المستخدمة هي السليكون (بـالرغم من أننـا سنرى لاحقاً بعض الخلايـا

المصنوعة من مـادة غير السليكون) . إن النـوع (N) مـصنوع مـن مـادة السليكون البلـوري المطلي بطبقة خفيفة من شوائب الفسفور(Phosphore) بطريقة تجعل طبقة الشوائب تسيطر على الفائض من الإلكترونات الحرة . وبمـا أن الإلكترونـات (Electrons) ذات شحنة سالبة فـإن السليكون المطلـي بهـذه الطريقـة يـدعى نـوع (N) الـسالب (Negative Charge) . أمـا النـوع (P) فهـو مـصنوع أيضاً مـن مـادة السليكون البلـوري ولكنـه مطلـي بطبقـة خفيفـة مـن الـشوائب تـدعى البـورون (Boron) تجعـل المـادة ذات عجـز بالـنسبة للإلكترونـات الحـرة . وهذه الإلكترونات المفقودة تدعى ثقوبـاً (Holes) ، وهـذا يعنـي أن الـشحنة الموجبـة فـي هـذه الطبقة أكثر من الشحنة السالبة ، فلذلك يعتبر السليكون المطلـي بهـذه الطريقـة هو نـوع (P) الموجب (Positive Charge) .

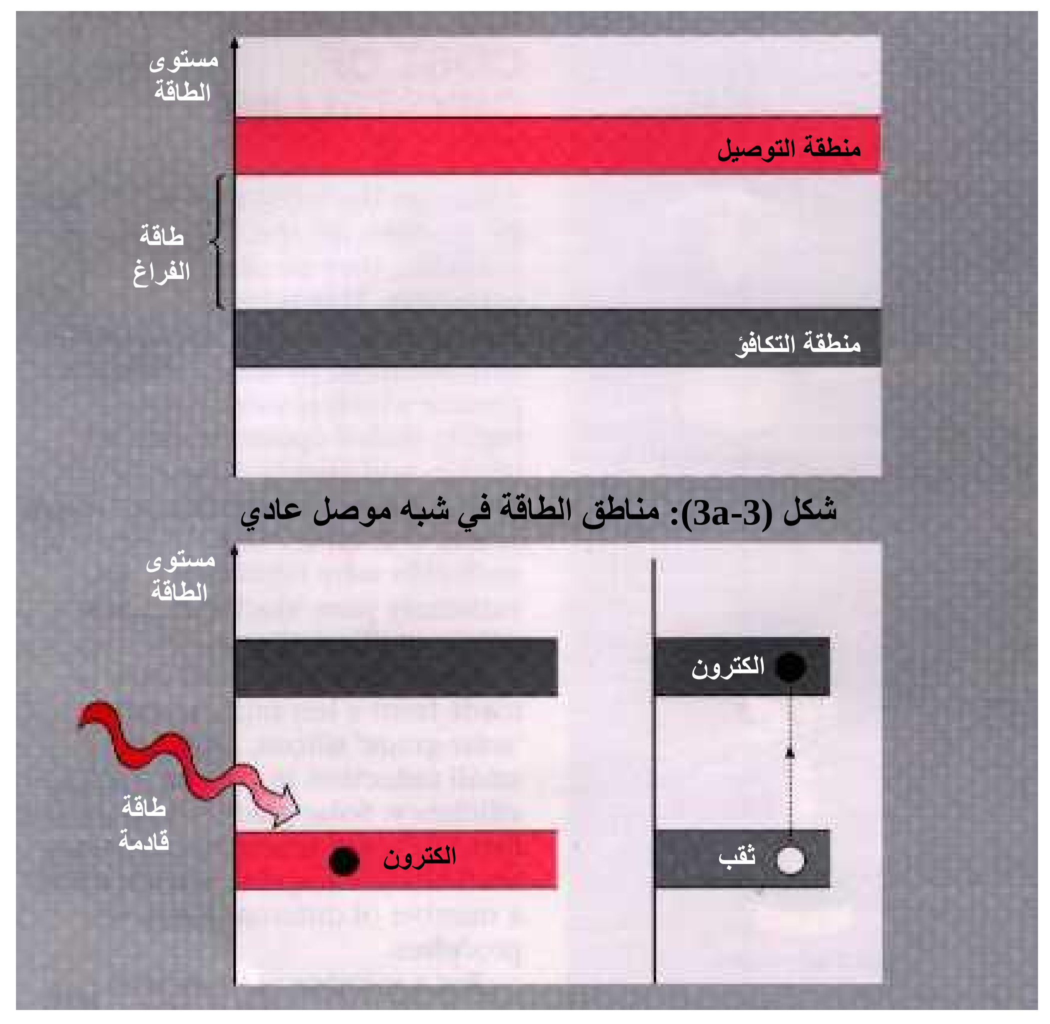
وعند ربط هاتين الطبقتين المختلفتين من المادة شبه الموصلة ببعضـهما البعض سيظهر خط تماس بينهما يدعى خط الارتباط (P-N Junction) . ويتكون بذلك مجال كهربائي في منطقة خط التماس يقوم بتحريك الجسيمات السالبة الشحنة إلـى اتجاه معين والجسيمات الموجبـة الشحنة إلـى اتجـاه معـاكس. ويكـون المجـال الكهربـائي المتكـون مشابهاً للمجـال الـذي يمكـن توليده عند حك مشط بلاستيكي بمادة من القماش . فعند سقوط فوتونات (Photons) الإشعاع الشمسي علـــى منطقـة التمـاس (P-N Junction) ستنتقل تلك الفوتونـات طاقتهـا إلـى بعـض الإلكترونات في المادة مسببة رفعها إلى مستوى طاقة أعلى . ففي الظروف الاعتياديـة تقـوم الإلكترونـات بالمساعدة علـى تماسـك المـواد مـع بعـضها بعـضاً مكونـة ربطـاً متكافئـاً مـع الذرات القريبة ولكنها لا تستطيع الحركة . وفي هذه الحالـة المتحفزة ، بعد سقوط الإشـعاع الشمسي، فـإن الإلكترونـات تكـون حـرة لتوليـد تيـار كهربـائي يمـر خـلال المـادة . وعنـدما تتحـرك الإلكترونـات تتـرك وراءهـا ثقوبـاً (Holes) فـي المـادة تتحـرك أيضـاً . فعنـد تكـوّن منطقـة الارتبـاط (P-N Junction) فـإن بعـض الإلكترونـات المجـاورة لهـا تنجـذب مـن جهـة (N) لتتحـد مـع الثقـوب فـي جهـة (P) . وبـنفس الطريقـة فـإن الثقـوب المجـاورة (الموجبـة) لمنطقة الارتباط تنجذب لتتحد مع الإلكترونات (السالبة) في جهة (N) القريبة .

والتأثير النهائي الناتج من هذا الوضع حول منطقـة الارتبـاط هو وجـود شحنة موجبـة أكثـر من السابق على جهة (N) ووجود شحنة سالبة أكثر من السابق على جهـة (P) . وهـذا يعنـي وجـود مجـال كهربـائي معـاكس حـول منطقـة الارتبـاط يكـون موجبـاً حـول جهـة (N) وسـالباً

حول جهة (P) . والمنطقة التي تقع حول منطقة الارتباط ستكون مفرغة من الشحنات (الإلكترونات والثقوب) وتسمى بذلك منطقة التفريغ أو الاستنزاف (Depletion Region) .

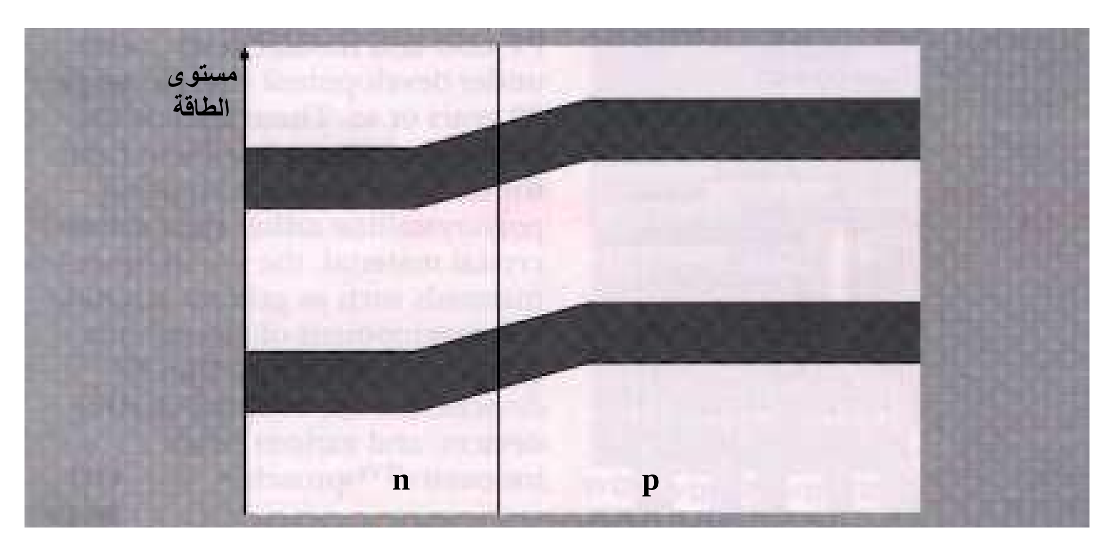
وعند تهيج الإلكترونات في منطقة الاتصال بواسطة فوتونات الإشعاع الشمسي ستقفز إلى منطقة التوصيل (Conduction Band) تاركة ورائها ثقوباً في منطقة التكافؤ (Valance Band) وبذلك ستتولد حوامل من الشحنة المزدوجة (زوج من الكترون وثقب) ، وتحت تأثير المجال الكهربائي المعاكس ستتجه الإلكترونات إلى جهة (N) وتتجه الثقوب إلى جهة (P) .

يمكن تصوير العملية كمستويات طاقة في المادة كما في الشكل (3-3) . تدخل الإلكترونات المتهيجة بواسطة الفوتونات منطقة الارتباط ، ويمكن تصورها متدحرجة إلى الأسفل تحت تأثير المجال الكهربائي في منطقة الاتصال . وكذلك يمكن تصوير الثقوب وكأنها تطفو إلى الأعلى تحت تأثير المجال في منطقة الارتباط إلى جهة (P) .

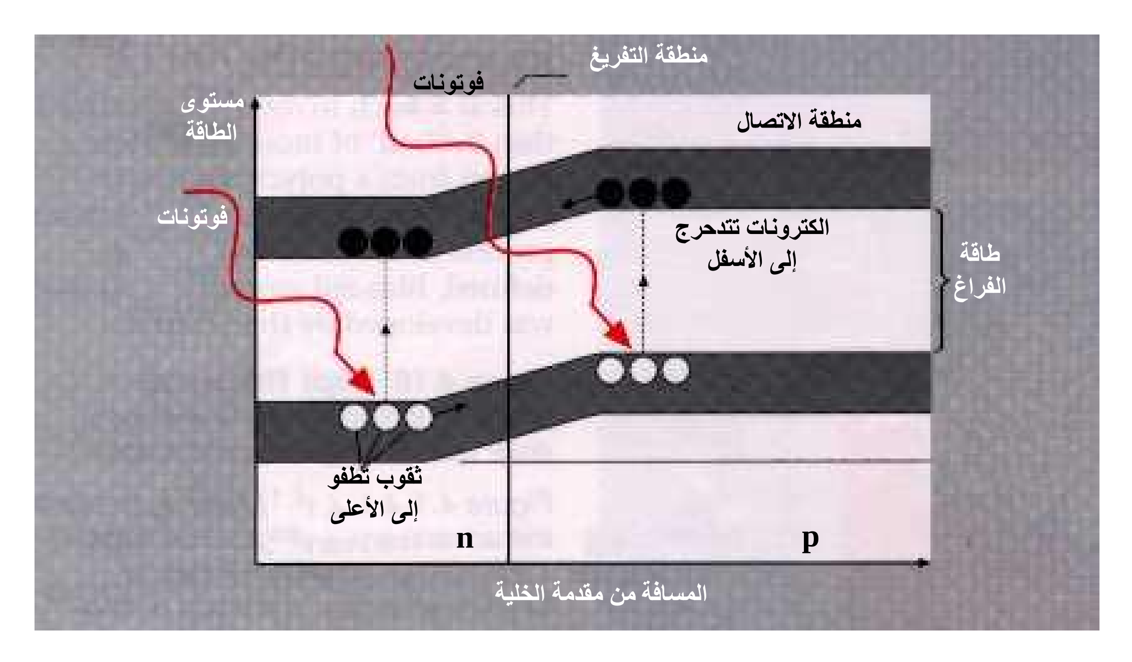


شكل (3a-3): مناطق الطاقة في شبه موصل عادي

شكل (3b-3): عند امتصاص طاقة الإشعاع يتنقل الالكترون الى منطقة التوصيل تاركاً ثقباً في منطقة التكافؤ



شكل (3c-3): عند اتحاد أشباه موصلات من نوع p و n فان مناطق الطاقة المختلفة لهما تتحد وبذلك يتكون توزيع طاقة جديد



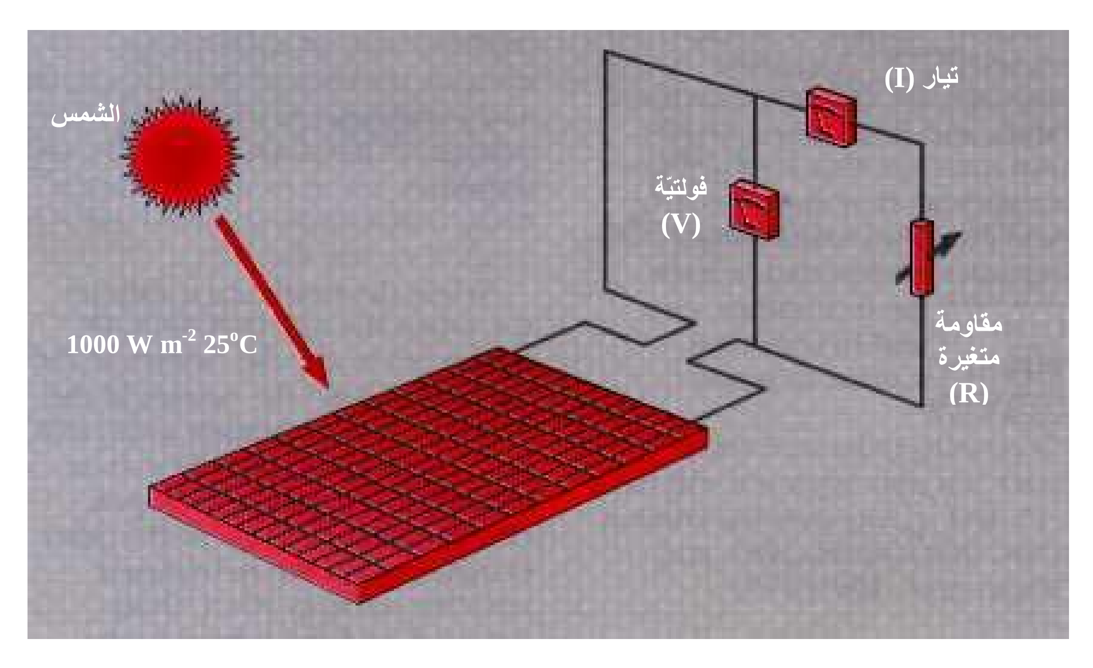
شكل (3d-3): في منطقة الاتصال تقوم فوتونات الضوء بتهّيج الالكترونات وانتقالها من منطقة التكافؤ إلى منطقة التوصيل فتتدحرج الالكترونات الى منطقة (n) وتطفو الثقوب إلى منطقة (p)

إن سريان الإلكترونات إلى جهة (N) هو ما يسمى بالتيار الكهربائي . فإذا كانت هنالك دائرة خارجية لمرور التيار فيها فإن الإلكترونات المتحركة تترك شبه الموصل إلى أحد الأسلاك الخارجية في أعلى الخلية وفي نفس الوقت تتجه الثقوب إلى اتجاه معاكس خلال المادة إلى أن تصل إلى السلك الخارجي الآخر في قاع الخلية ، وعندها ستمتلئ بواسطة الإلكترونات الداخلة في نصف الدائرة الخارجية الآخر .

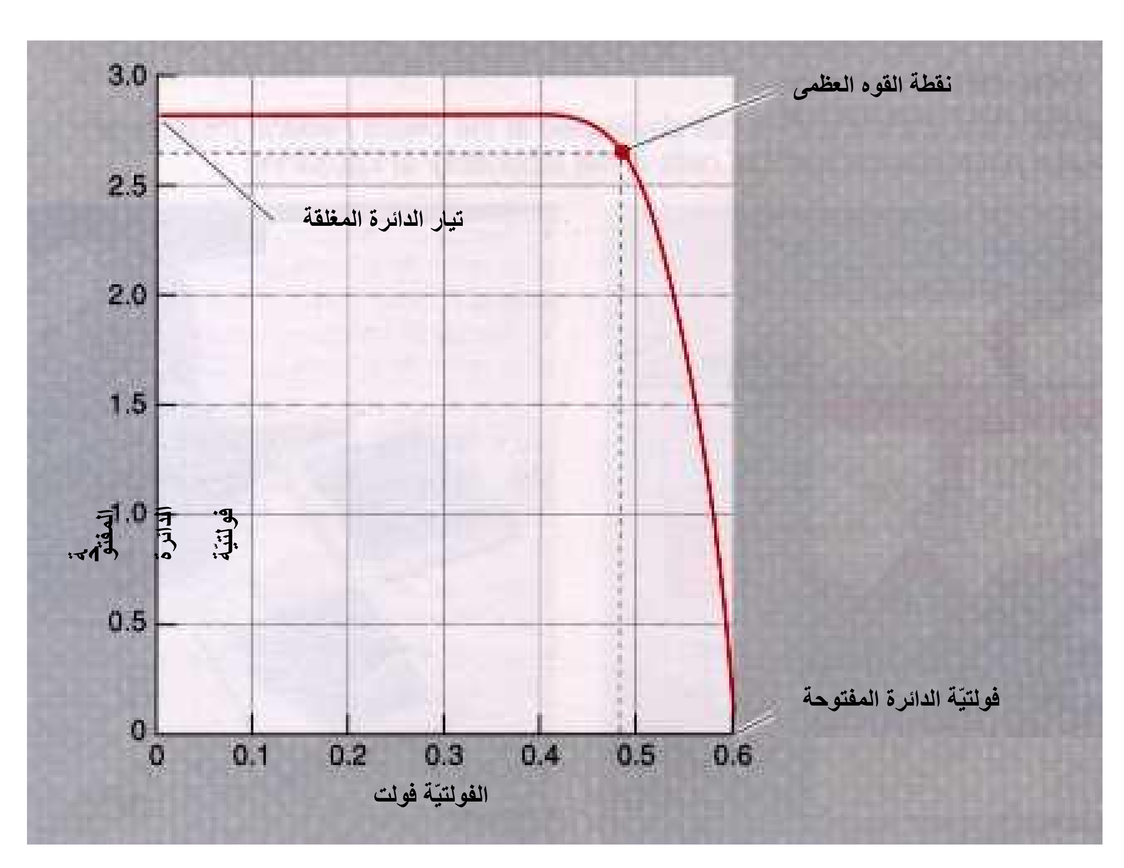
إن توليد القوة الكهربائية يتطلب وجود فولتية وتيار ، ولهذا فإنه لإنتاج قوة كهربائية على الخلية يتطلب توليد فولتيّة ، بالإضافة إلى التيار المجهز بواسطة حركة الإلكترونات . أما الفولتية فتجهز بواسطة تأثير المجال الكهربائي الداخلي حول منطقة الاتصال (P-N Junction) . والخلية الشمسية الاعتيادية الواحدة تنتج نصف فولط (0.5V) وتياراً مقداره 2.5 أمبير ، وهذا يعادل طاقة عظمى تصل إلى 1.25 واط . ويمكن لبعض الخلايا إنتاج تيار أكبر وفولتيّة أعلى اعتماداً على نوعية التصميم .

3-3 الخصائص الكهربائية للخلايا والألواح الشمسية السليكونية

أبسط تعريف لخلية شمسية ذات مساحة مقدارها 100.0 سنتمتر مربع هو أنها بطارية شمسية تقوم بإنتاج فولتيّة مقدارها نصف فولط (0.5V) وتيار يتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي يصل إلى مقدار يتراوح بين 2.5-3.0 أمبيرفي حالة الإشعاع الشمسي الأقصى . وقبل استخدام الخلية الشمسية (Photovltaic) يجب التأكد من سلوكها عند ربطها إلى حمل معين. والشكل (3-4) يبين خلية شمسية مساحتها 100 سنتمتر مربع مربوطة إلى مقاومة متغيرة (R) بالإضافة إلى ربط جهازي الأميتر لقياس التيار والفولتميتر لقياس فرق الجهد أو الفولتيّة . (عادة يتم قياس أداء الخلية تحت ظروف قياسية ، وهي إشعاع شمسي مقداره 1000.0 واط في المتر المربع ودرجة حرارة 25 درجة مئوية) . وعندما تكون المقاومة غير محدودة (ما لا نهاية) يكون التيار (I) في الدائرة صفراً ويكون فرق الجهد (V) أعلى ما يمكن ، ($Open Circuit voltage – V_{oc}$) وهذا ما يسمى بفولتيّة الدائرة المفتوحة . وفي الحالة المعاكسة تماماً ، أي عندما تكون المقاومة صفراً وتكون الخلية كدائرة مغلقة ، فإن التيار سيكون بحالته العظمى وهذا ما يسمى بتيار الدائرة المغلقة (Short Circuit Current Isc) . وإذا قمنا بتغير المقاومة بين الصفر والمالا نهاية فإن التيار والفولتية سيتغيران كما في الشكل (3-5) والذي يسمى منحنى خصائص الفولتية والتيار (I-V Curve) . ويمكن بعد النظر إلى المنحنى الاستنتاج بأن الخلية تنتج طاقتها القصوى (Maximum Power) عندما يتم تغيير المقاومة الخارجية حتى تكون قيمتها مساوية لنقطة الطاقة العظمى (Maximum Power Point) على المنحنى . وعندما يكون الإشعاع الشمسي أقل من 1000 واط بالمتر المربع فإن شكل المنحنى يكون مشابهاً للمنحنى الأول ولكن المساحة تحت المنحنى ستكون أقل ونقطة الطاقة العظمى ستتحرك إلى اليسار . إن تيار الدائرة المفتوحة I_{oc} يتناسب طردياً مع زيادة درجة حرارة الخلية T ($I_{0c} \propto T$) .



شكل (3-4): خلية شمسية مربوطة إلى مقاومة متغيرة ومقياس للفولتيّة ومقياس للتيار



شكل (3-5): منحنى خصائص الفولتيّة والتيار لخلية سلكونية تحت الظروف الاعتيادية

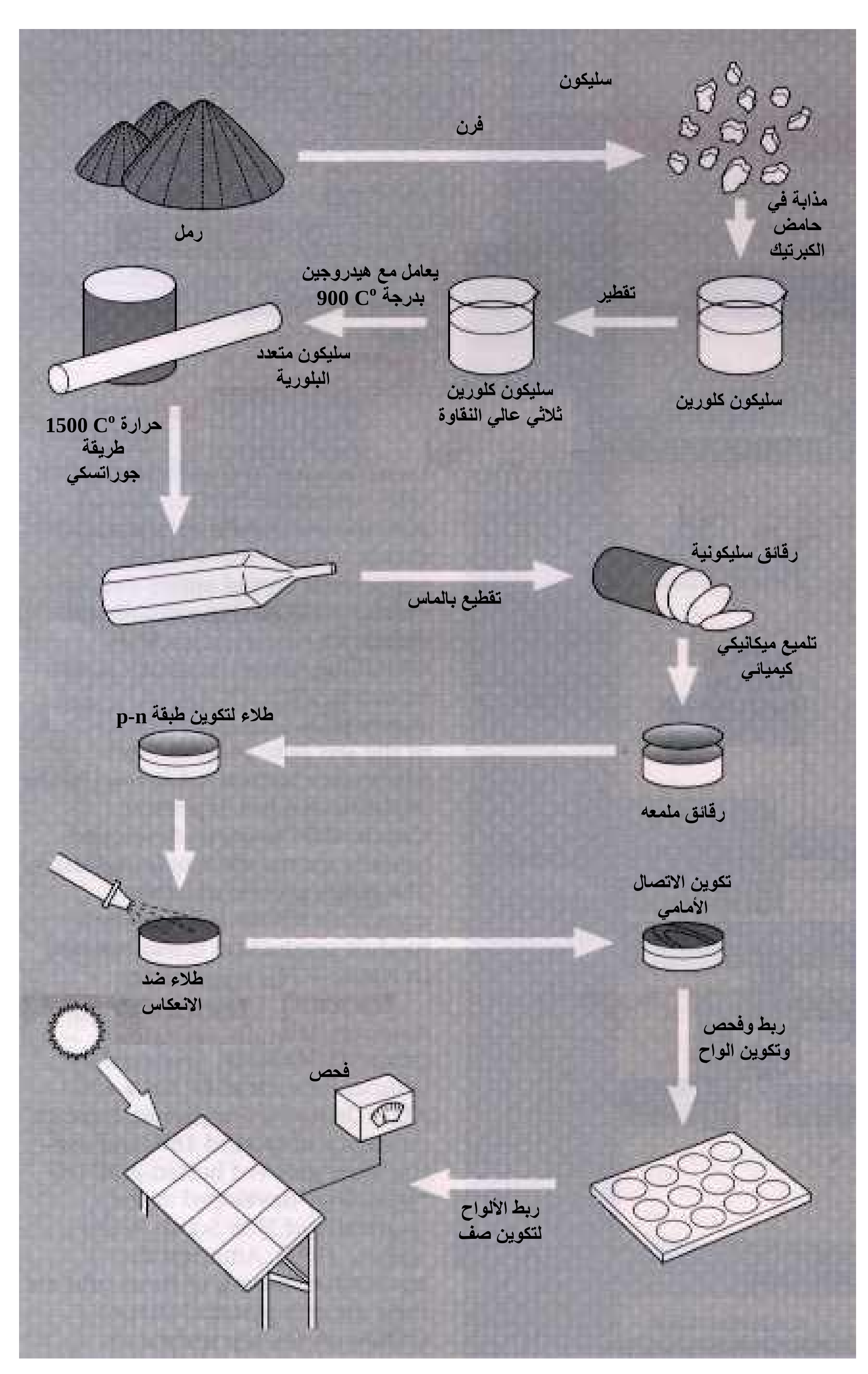
ويمكن أن نستنتج من النظر إلى الشكل (3-5) بأن خلية ذات مساحة 100 سنتمتر مربع يمكن أن تنتج جهداً كهربياً (فولتيّة) مقدارها نصف فولط وبتيار مقداره أقل من 3.0 أمبير. وبما أن معظم تطبيقات الخلايا الشمسية تقوم بشحن بطارية ذات 12 فولط فإن لوحاً شمسياً مكوناً من 26 خلية شمسية مربوطة على التوالي تؤمن الحصول على حوالي 13 فولط وهو كافٍ لشحن بطارية ذات 12 فولط حتى ولو كان الجو غير مشمس .

3-4 بعض أنواع الخلايا الفولطاضوئية

3-4-1 الخلايا السلكونية أحادية البلورية

معظم الخلايا الفولطاضوئية المصنعة لغاية فترة قريبة كانت من سليكون نقي ذي هيكل مستمر أحادي البلورية (Single Crystal) وبدون شوائب (Impurities). والسليكون أحادي البلورية يصنع عادة من حبوب صغيرة من البلور مسحوبة ببطء من كتلة مذابة من سليكون متعدد البلورية بطريقة متقدمة وغالية الثمن تدعى بعملية زوجرالسكي (Czochralski Process) طورت خصيصاً للصناعة الإلكترونية . والخطوات الكاملة لإنتاج الخلية السلكونية الأحادية البلورية واللوح الشمسي مبينة في الشكل (3-6) . ومعظم الخلايا السلكونية الأحادية البلورية المتوفرة في الأسواق ذات كفاءة تقارب16%. وبالرغم من ميزة الكفاءة العالية التي تختص بها الخلية الشمسية الأحادية البلورية فإن سعرها مرتفع جداً لكونها مصنوعة من سليكون متعدد البلورية وعالي النقاوة لكون طريقة التصنيع غالية وتحتاج إلى عمال مهرة . ويتم حالياً تصنيع بعض الخلايا من سليكون أقل نقاوة ، وهذه الخلايا تكون أرخص سعراً وتنتج بكلفة أرخص باستخدام عمليات مختلفة قليلة الكلفة ولكنها ذات كفاءة أقل وعمر زمني أقل .

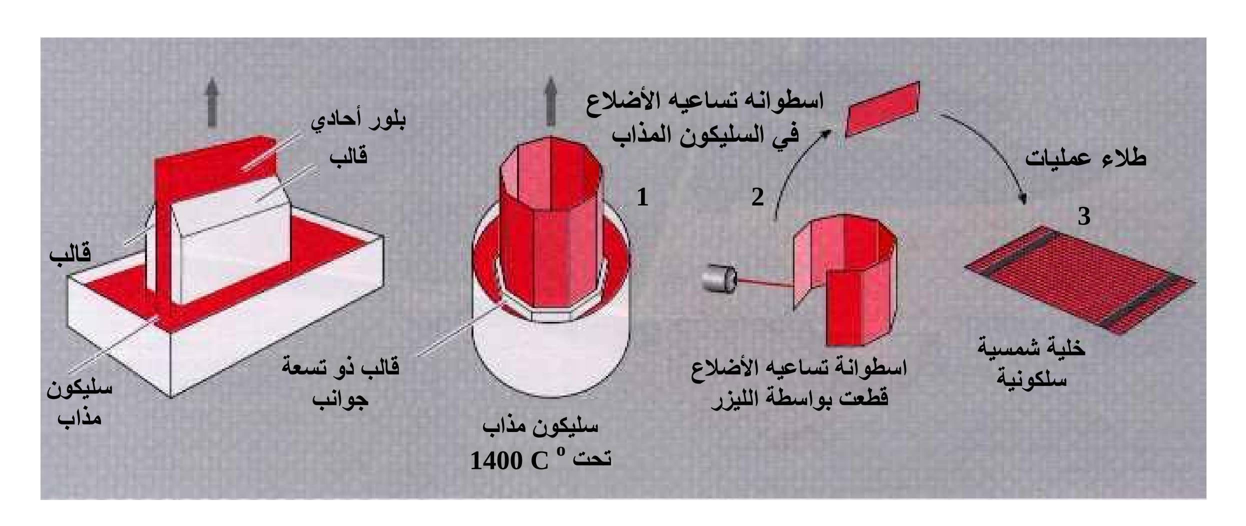
لقد تم خلال العشرين سنة الماضية تطوير طرق مختلفة لتقليل كلفة تصنيع الخلية الشمسية والألواح . من هذه الطرق تنمية السليكون على هيئة رقيقة أو شريط (Thin Film) أو استخدام سليكون متعدد البلورية بدلاً من أحادي البلورية (Polycrystalline Silicon) أو استخدام مواد أخرى مثل الغاليوم ارسنايد (Gallium arsenide) أو تصنيع خلايا غير بلورية كالخلايا السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon) .



شكل (3-6): خطوات إنتاج خلية سلكونية أحادية البلورية ولوح شمسي

2-4-3 الخلايا السلكونية الشريطية

يتم في هذه الطريقة إنتاج شريط من السليكون الأحادي البلورية من سليكون متعدد البلورية أو من سليكون بلوري أحادي مذاب . والعملية الرئيسية المستخدمة تعتمد على تحديد الحافة وعملية إنماء تغذية الرقيقة (Edge-defined, film-fed growth process)، وقد تم استخدامها من قِبل شركة سولار موبيل الأمريكية (Solar Mobile) . ويبين الشكل (3-7) خطوات عملية إنتاج هذه الخلايا .



شكل (3-7): خطوات إنتاج خلية سلكونيه شريطية

3-4-3 الخلايا السلكونية المتعددة البلورية

يتكون السليكون المتعدد البلورية (Polycrystalline Silicon Cells) من حبيبات صغيرة من البلور الأحادي . ويمكن إنتاج طبقة رقيقة من السليكون المتعدد البلورية بعدة طرق أحدها يتضمن تكوين سبيكة من السليكون المتعدد البلورية المذاب ، ومن ثم يتم تقطيع السبيكة بمنشار رقيق إلى رقائق مربعة خفيفة كما هو مبين بالشكل (3-8) ، ويتم بعد ذلك تصنيعها بنفس طريقة تصنيع السليكون الأحادي البلورية .



شكل (3-8): سبيكة سليكونية كبيرة ورقائق مربعة خفيفة

بالرغم من كون الخلايا الكهروضوئية (Polycrystalline Photovollaic Cells) المتعددة البلورية أرخص وأسهل تصنيعاً من الخلايا الأحادية البلورية (Single Crystal Cells) إلاّ أنها أقل كفاءة وذلك لكون حاملات الشحنة (كالالكترونات والثقوب) المولدة من قِبل فوتونات الإشعاع الشمسي يمكن أن تتجمع على الحدود بين الحبيبات داخل السليكون المتعدد البلورية . وقد وجد بأنه عند عملية تصنيع المادة بطريقة تكون فيها الحبيبات كبيرة الحجم ويتم توجيهها من الأعلى إلى الأسفل ، وذلك للسماح للإشعاع الشمسي بالتغلغل بعمق خلال الحبيبات ، فإن كفاءة هذه الخلايا تتحسن . والألواح السليكونية المتعددة البلورية والمتوفرة في الأسواق الحالية تصل إلى كفاءة مقدارها 10% أو أكثر بقليل . ولامتصاص معظم الإشعاع الشمسي الساقط يجب أن يكون سمك الخلية السليكونية المتعددة البلورية عدة مئات من المايكرونات (واحد على المليون) ، ولكن إحدى الشركات الأمريكية (Astro power Inc) أثبتت بأنه يمكن استخدام تقنيات مختلفة لالتقاط الإشعاع الشمسي ، وبهذا يمكن أن يكون سمك الخلية ما يقارب 20 مايكرونا، وقد تصل كفاءة هذه الصفائح الرقيقة إلى حوالي 15%. وبالرغم من كون هذه الصفائح رقيقة جداً إلاّ أنها أكثر سمكاً من الصفائح المستخدمة في بعض الخلايا الأخرى كالخلية السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon Cells) ولهذا تدعى أحياناً بالصفائح السميكة للخلايا المتعددة البلورية (Thick Polycrystalline Cells) . وفي عام 1994 تم نصب محطة في منطقة ديفز (Davis) بولاية كاليفورنيا ذات قدرة مقدارها 18 كيلوواط وتتكون من 312 لوحاً شمسياً تم تصنيعها من هذا النوع من الرقائق الخفيفة.

3-4-4 خلايا الغاليوم أرسنايد (Gallium Arsenide Cell)

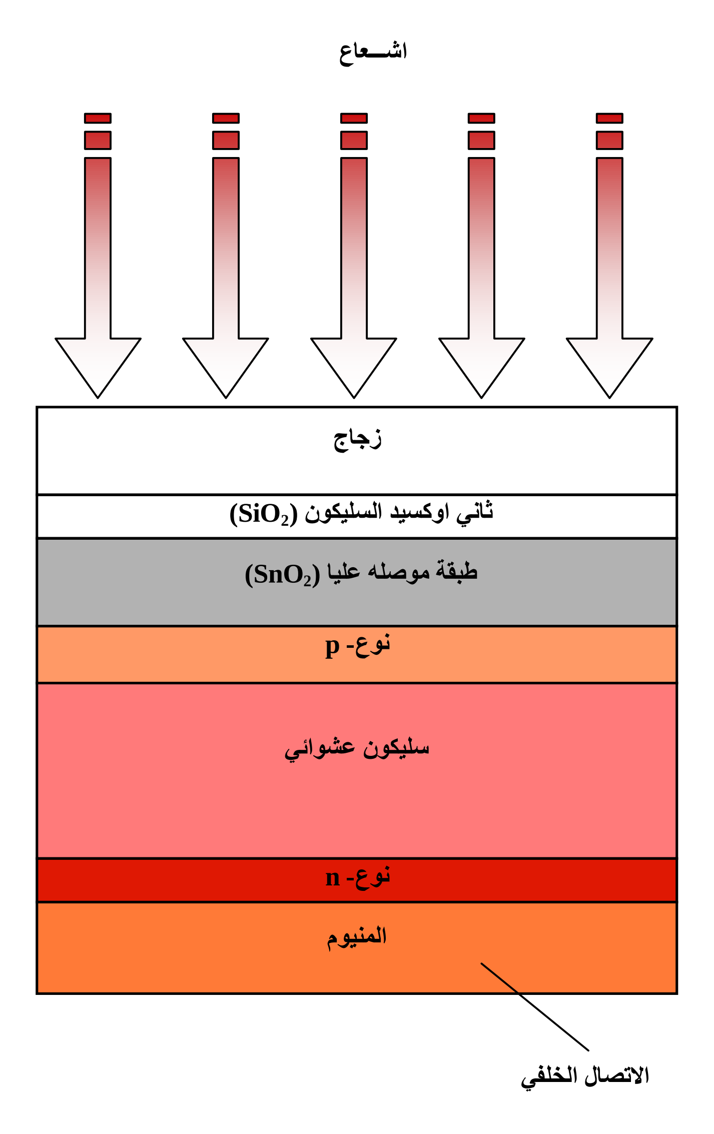
السليكون ليس المادة الوحيدة الملائمة للاستخدام في تصنيع الخلايا الكهروضوئية، فهناك مواد أخرى يمكن استخدامها كالغاليوم أرسنايد (Gallium Arsenide Cell) التي تمتلك هيكلا بلورياً مشابهاً للسليكون ، وهي تتكون من ذرات متعاقبة من الغاليوم والأرسنايد . ولكونها ذات معامل امتصاص عالٍ للضوء فإنها ملائمة جداً للاستخدام في تطبيقات الخلايا الشمسية ، وهي تتمتع بكفاءة جيدة ، ويمكن أن تعمل تحت ظروف درجة حرارة عالية نوعا ما بدون تناقص في أدائها كالخلايا السليكونية وبعض أشباه الموصلات التي تعاني من هذه المشكلة . وبهذه المواصفات يمكن استخدام خلايا الغاليوم أرسنايد في منظومات الخلايا الشمسية المركزة . ومن الأمور الأخرى التي يجب معرفتها هي أن كلفة تصنيع هذه الخلايا أعلى من كلفة تصنيع الخلايا السليكونية وذلك لكون عمليات إنتاجها غير متطورة حالياً . وتستخدم هذه الخلايا عند الحاجة إلى خلايا ذات كفاءة عالية كما هو الحال في تطبيقات الفضاء . وقد استخدمت أيضاً في تشغيل سيارة أنتجتها شركة جنرال موتورز أطلق عليها إسم صن ريسير (Sun Racer) وفازت عام 1987 بسباق عالمي للسيارات المسيرة بالطاقة الشمسية عندما قطعت مسافة 3000 كيلو متر بسرعة 66 كيلو متر في الساعة .

3-5 الخلايا ذات الأغشية الرقيقة (Thin Film Photovollaic Cells)

3-5-1 الخلية السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon Cells)

يمكن تصنيع الخلايا الشمسية بطريقة أرخص من طرق تصنيع الخلايا البلورية الأحادية والمتعددة . وهذه الخلايا تدعى خلايا السليكون العشوائي (A-Si) وتكون ذرات السليكون فيها أقل ترتيباً من النوع البلوري . ففي السليكون العشوائي لا ترتبط كل ذرة ارتباطاً كاملاً مع الذرات المجاورة وإنما تترك ما يسمى بالرباط المتدلي (Dangling Bands) وتستطيع امتصاص إلكترونات إضافية عند إجراء عملية الطلاء . وعملية التصنيع تتم بواسطة خليط من غاز يحتوي على السليكون والهيدروجين (SiH_4) وكمية قليلة من الشوائب مثل البورون التي تتحلل كهربائياً بطريقة يمكن أن تكون طبقة رقيقة من السليكون العشوائي على قاعدة من مادة مناسبة كالفولاذ المرن (Elastic Stainless Steel) . إن الهيدروجين في هذا الغاز يقوم بتوفير إلكترونات

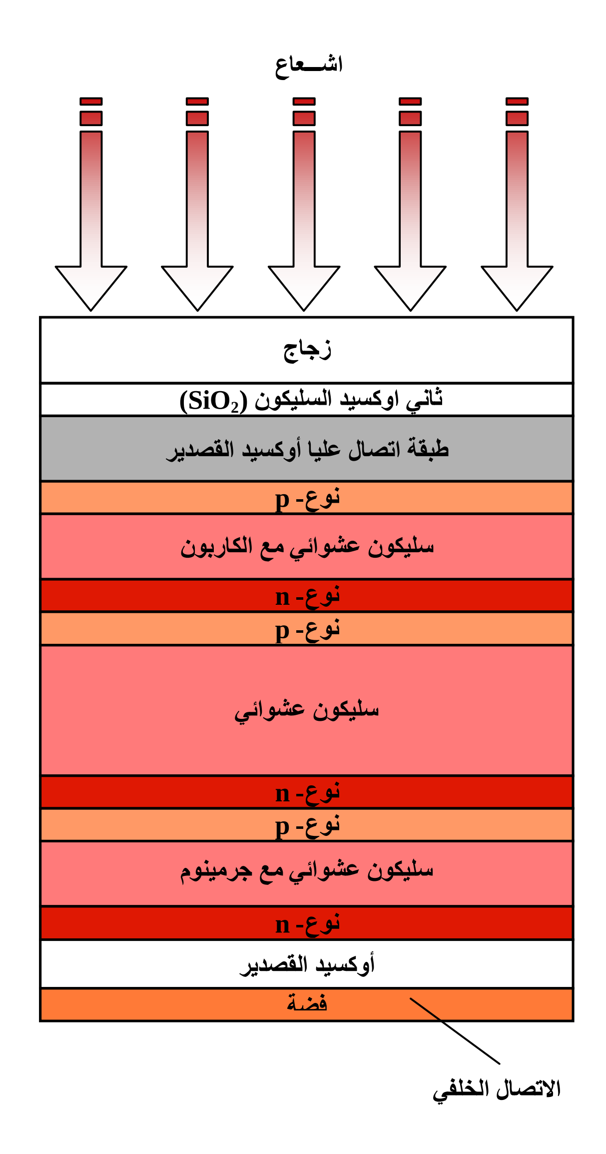
إضافية تتحد مع روابط السليكون المتدلية (Dangling Silicon Bands) لتكوين طبقة من السليكون والهيدروجين. والشوائب الموجودة في الغاز لها تأثيرها الاعتيادي بتوزيع حاملات الشحنة لتحسين القابلية التوصيلية للمادة . وتختلف خلايا السليكون العشوائي عن الخلايا المصنعة بطرق أخرى بالنسبة لمنطقة الارتباط (P-N Junction) إن تتكون في هذا النوع من الخلايا منطقة تسمى (P-I-N) وهي طبقة رقيقة جداً من نوع (P) من السليكون العشوائي تأتي بعدها طبقة داخلية (I) أكثر سمكاً من مادة السليكون العشوائي الخالي من الشوائب ، ثم طبقة رقيقة جداً نوع (N) من السليكون العشوائي . ويوضح الشكل (3-9) هيكلية هذه الخلية . والتأثير الكهروضوئي على الخلية السليكونية العشوائية مشابه لما في الخلايا السليكونية البلورية باستثناء أن سمك حيز الارتباط (Band Gap) أكبر لكنه غير محدد بصورة واضحة .



شكل (3-9): هيكلية خلية سليكونية عشوائية

وللخلية السليكونية العشوائية إيجابيات وسلبيات . ومن إيجابياتها أنها اقل سمكاً وأرخص سعراً من الخلايا السليكونية البلورية ، وهي أيضاً أكثر امتصاصاً للإشعاع الشمسي، كما أن عمليات تصنيعها تجري تحت ظروف درجة حرارة قليلة جداً مقارنة بالخلايا السليكونية البلورية ، ولهذا فهي تحتاج إلى طاقة أقل . وهي ملائمة جداً للإنتاج المستمر ويمكن طلاؤها على مواد مختلفة صلدة ومرنة كالحديد والزجاج والبلاستيك . ومن سلبيات الخلايا السليكونية العشوائية قلة كفاءتها مقارنة بالخلايا السليكونية البلورية الأحادية والمتعددة . إن أعلى كفاءة تم الحصول عليها في المختبر من هذا النوع من الخلايا الكهروضوئية لا تتجاوز 12% ، وإن كفاءتها تتناقص مع مدة تعرضها للشمس من 8% إلى ما يقارب 4% بعد عدة أشهر من الاستخدام أي أن عمرها الزمني قليل . كما أن مخلفاتها التي تحول إلى الأرسانيد (الزرنيج) ضارة بالبيئة .

وتجري محاولات كثيرة جادة لتحسين كفاءتها وحل مشكلة نقصان كفاءتها مع الاستخدام . إن إحدى الطرق المستخدمة لتحسين كفاءة التحويل هي وضع طبقتين من الأغشية الرقيقة واحدة فوق الأخرى بحيث إن كلا من هاتين الطبقتين تمتص جزءاً من الطول الموجي للإشعاع الساقط . وحيز الارتباط (Band Gap) يمكن توسيعه بواسطة استخدام طبقة من الكربون تجعل المادة أكثر امتصاصاً للضوء على النهاية الزرقاء للحزمة الضوئية . وبالطلاء بمادة الجرمنيوم (Germanium) فإن حيز الربط يقل مما يجعل المادة أكثر استجابة للضوء على النهاية الحمراء من الحزمة . لذا فإن حيز الارتباط يكون عريضاً (Wide Band Gap) في منطقة الجزء العلوي للسيلكون العشوائي فيمتص فوتونات الضوء ذات الطاقة العالية في النهاية الزرقاء من الحزمة الضوئية التي يتبعها غشاء رقيق آخر من السليكون العشوائي ، وكل من هذين الغشائين مصمم لامتصاص جزء من الذبذبات الضوئية القصيرة القريبة من النهاية الحمراء للحزمة الضوئية (الشكل 3-10) . وبالإضافة إلى زيادة كفاءة الخلية من هذه الطريقة فإن وضع طبقات متعددة له فائدة أخرى وهي تقليل النقصان في الكفاءات التي تحدث في الخلية السليكونية العشوائية ذات طبقة الارتباط الواحدة .



شكل (3-10): استخدام طبقتين من الأغشية الرقيقة لتحسين كفاءة الخلية الشمسية العشوائية مع الاستخدام

بـالرغم مـن الكفـاءة الحاليـة المتدنيـة للخلايـا الـسليكونيّة العشوائية فإنهـا تـستخدم بـصفة واسعة تجارياً وذلك لرخص أسعارها. وقد بلغت نسبة استخدامها في عـام 1990 حـوالي 30% من مجموع الخلايا المستخدمة في التطبيقات المختلفة .

والخلية السليكونية العشوائية ليست الوحيدة المناسبة بل هنالك بعض الخلايا المصنعة من تقنيـات الأغشيـــة الرقيقـــة (Thin Films) المتكونـــة مـــن عـــدة شبـــه موصـــلات (Semiconductor) مـن بينهـــا كـــوبر انديـــم ديسلنايد (CuIn Se_2 or CIS) وكـادميوم تيلرايد (CdTe) وقد وصـلت الخلايا المصنعة مـن هذه التقنيـات إلـى مرحلـة الإنتـاج التجاري في الوقت الحاضر .

3-5-2 خلايا الكوبرانديوم ديسلنايد (Copper Indium diselenide)

وهي مواد شبه موصلة مركبة من النحاس والانديوم والسلينايد (CIS) . وقد استخدمت فـي تـصنيع خلايـا وصـلت كفاءتهـا مختبريـاً إلـى 12% . وقـد قامـت شـركة سـيمنس (Simens) الألمانية بتصنيع ألواح من نوع (CIS) ذات مساحة 30 سنتمتر مربـع وبكفـاءة تعـادل 10% . وفـي عـام 1994 أعلنـت بأنهـا يمكـن أن تقـوم بتـصنيع هـذه الخلايـا علـى النطاق التجاري بالتعاون مع إحدى شركات الزجاج الأمريكية . وهذا النـوع من الخلايـا لا يعاني من مشكلة نقصان الكفاءة عند الاستخدام والذي ظهر فـي الخلايـا السليكونية العشوائية ولكن مشكلته تنحصر في سمك الغشاء الرقيق لهذه الخلايا ، فهو أكبر من الخلايا السليكونية العشوائية . وبما أن مادة الانديوم مـادة غاليـة الثمن ، وبـالرغم من أن الكمية المستخدمة قليلـة فـإن ذلك يؤثر علـى سـعرها . ومـن مـساوئ طريقـة تـصنيع هـذه الخلايا هو استخدام غازي الهيدروجين والسيلنايد وهو سام جداً ويـسبب مـشاكل صـحية كبيرة في حالة حدوث خلل عند التصنيع .

3-5-3 خلايا الكادميوم تليرايد (CdTe)

وهـي مـواد أخـرى شـبه موصـلة مناسـبة لاسـتخدام الخلايـا الفولطاضـوئية تتـألف مـن الكادميوم والتيلرايد . ومن محاسن خلايا الكادميوم تيلرايد هو إمكانيـة صـنعها باستخدام عملية بسيطة ورخيصة من الطلاء الكهربائي . وقد وصلت كفاءة الخلايا مـن هذا النـوع إلى 10% وبدون تنـاقص فـي الكفـاءة عند الاستخدام . ومـن مـساوئ هـذه الخلايـا هـو أن الكادميوم مادة سامة جداً ولهذا يجب أخذ الاحتياطات اللازمة أثناء عملية التصنيع .

3-6 منظومات الخلايا الفولطاضوئية المركزة

مـن الطـرق الأخـرى المـستخدمة للحـصول علـى طاقـة أكثـر مـن الخلايـا الشمـسية الفوتوضوئية هو تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام مرايا أو عدسـات أذ يمكن استخدام عدد أقل من الخلايا الشمسية للحصول على نفس كمية الطاقة عند استخدام المركزات، وهذا يعتمد على نسبة التركيز التي تتراوح من عدة مرات إلـى مئـات أو آلاف المرات . والأنظمـة ذات التركيـز العـالي تـستخدم متحسـسات معقـدة وغاليـة ومحركـات وأجهـزة سيطرة لتعقب حركة الشمس علـى محورين (الارتفـاع وزاويـة السمت) ، بحيث تتمكن

الخلية من استقبال أعلى إشعاع شمسي ممكن . إن المنظومات ذات نسبة التركيز القليلة تتعقب الشمس على محور واحد وتكون بذلك أقل تعقيداً .

7-3 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئية

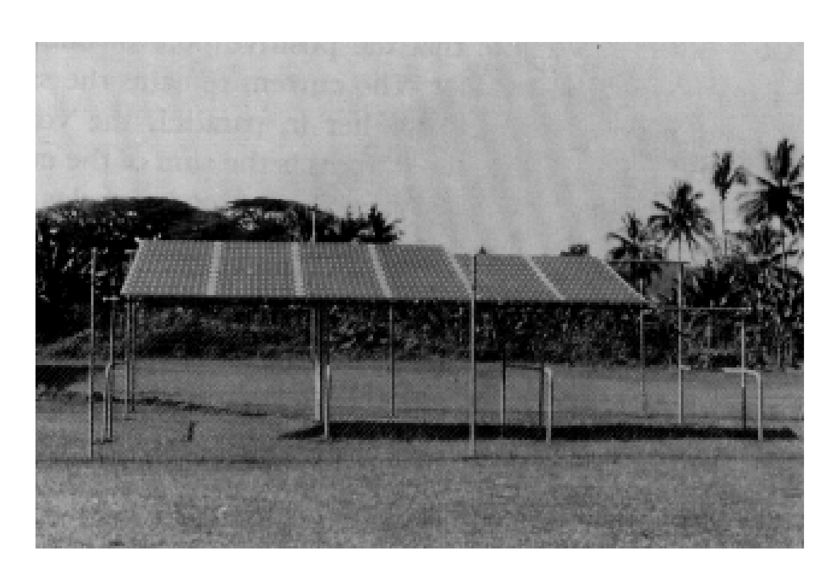
1-7-3 تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية

يزداد استخدام الخلايا الشمسية الكهروضوئية أو الفوتوفولطائية حالياً في الكثير من التطبيقات في مناطق بعيدة عن مناطق وجود الشبكة الكهربائية . وتوجد أمثلة على هذه التطبيقات موضّحة في الشكل(3-11) . وتتراوح هذه التطبيقات بين محطة تقوية راديوية على أحد الجبال أو تزويد الوحدات التلفونية الخارجية أو شاحنات بطاريات لبعض القوارب والكرفانات أو كهربة السياجات الخارجية أو إنارة الشوارع وغيرها. ولمعرفة كمية الألواح الشمسية أو سعة البطاريات اللازمة لتزويد منطقة ما بالطاقة الكهربائية يجب أن يتم تزويد مصمم منظومات الخلايا الشمسية بالمعلومات التالية :

1- الاستهلاك اليومي والأسبوعي والسنوي للطاقة الكهربائية .

2- كمية الإشعاع الشمسي اليومي والأسبوعي والشهري والسنوي الواصل إلى المنطقة التي توجد فيها المنظومة .

3 - عدد الأيام الغائمة المتكررة التي يجب أن تقوم البطارية بها بتزويد الحمل .



شكل (3-11): إحدى تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية

فمعرفة مكونـات منظومـة الخلايـا الشمـسية اللازمـة لتزويـد حمـل مـا معقدة ، ولـهذا فـإن معظـم الـشركات المنتجـة للخلايـا الشمـسية أنتجـت بـرامج حاسـوبيّة لمـساعدة المهندسـين المصممين لحـساب مـساحات وسـعات مكونـات المنظومـة وأسـعارها بدقـة كافيـة لتغطيـة متطلبات الأحمال في المناطق المختلفة .

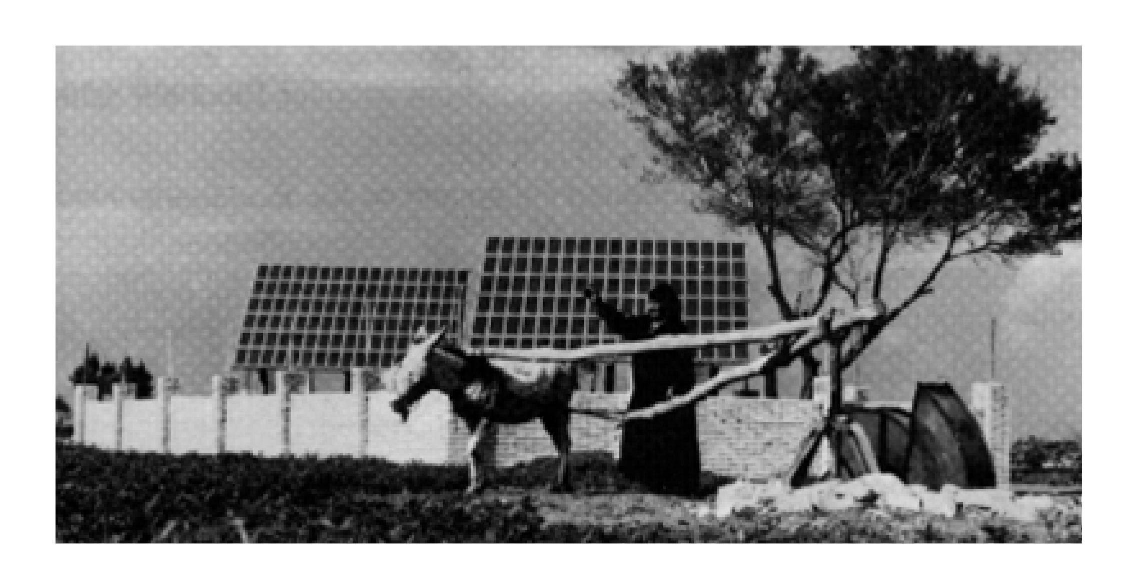
2-7-3 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئية في بعض البلدان النامية

فـي معظـم البلـدان المتقدمـة تكـون الـشبكة الكهربائيـة موزعـة بـصورة كاملـة والطاقـة الكهربائيـة المولـدة مـن الطاقـة التقليديـة ذات كلفـة قليلـة مقارنـة بكلفـة إنتـاج الطاقـة مـن منظومـات الطاقـة المتجـددة ، ولـهذا فإنـه مـن الـصعب علـى الطاقـة المتجـددة خـصوصاً الخلايا الفولطاضوئية التنافس مع المصادر التقليدية .

وفي الدول النامية وبالأخص فـي المنـاطق القرويـة والنائيـة نجد أن الطاقـة الكهربائيـة غيـر متوفرة، ولـهذا فـإن توليـد الطاقـة الكهربائيـة مـن الخلايـا الشمسية يكـون منافساً قويـاً لتوليـد الطاقة من الوسائل الأخرى كاستخدام الديزل، خاصة في البلدان التـي تـنعم بإشـعاع شمـسي عالٍ. وإن استخدام الخلايا الشمسية يتوسّع باستمرار وبصورة سريعة في مختلف التطبيقات خاصـة فـي مجـالات ضـخ الميـاه ، ومنظومـات الـري ، ومنظومـات ميـاه الـشرب، وتـشغيل ثلاجـات الأدويـة ، وفـي الأعمـال المنزليـة والعامـة كالإنـارة وتـشغيل الراديـو والتلفزيـون والفيـديو وغيرهـا مـن وسـائل الراحـة ، وإنـارة الـشوارع ومنظومـات الاتـصالات . ويبـين الشكلان (12a, b-3) بعض التقنيات المستخدمة في عدد من البلدان النامية .



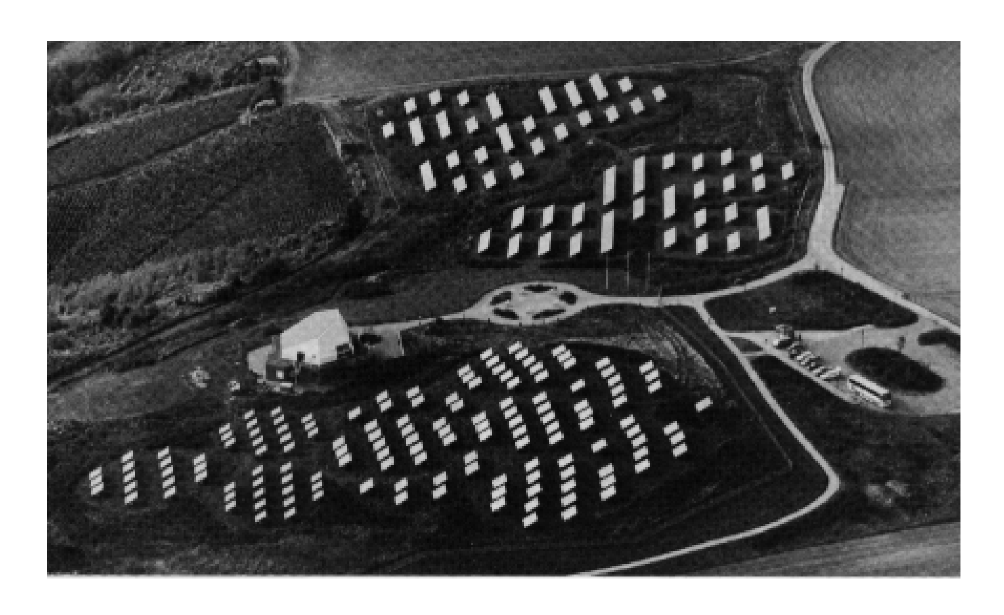
شكل (12a-3): بعض تطبيقات الخلايا الشمسية في الدول النامية



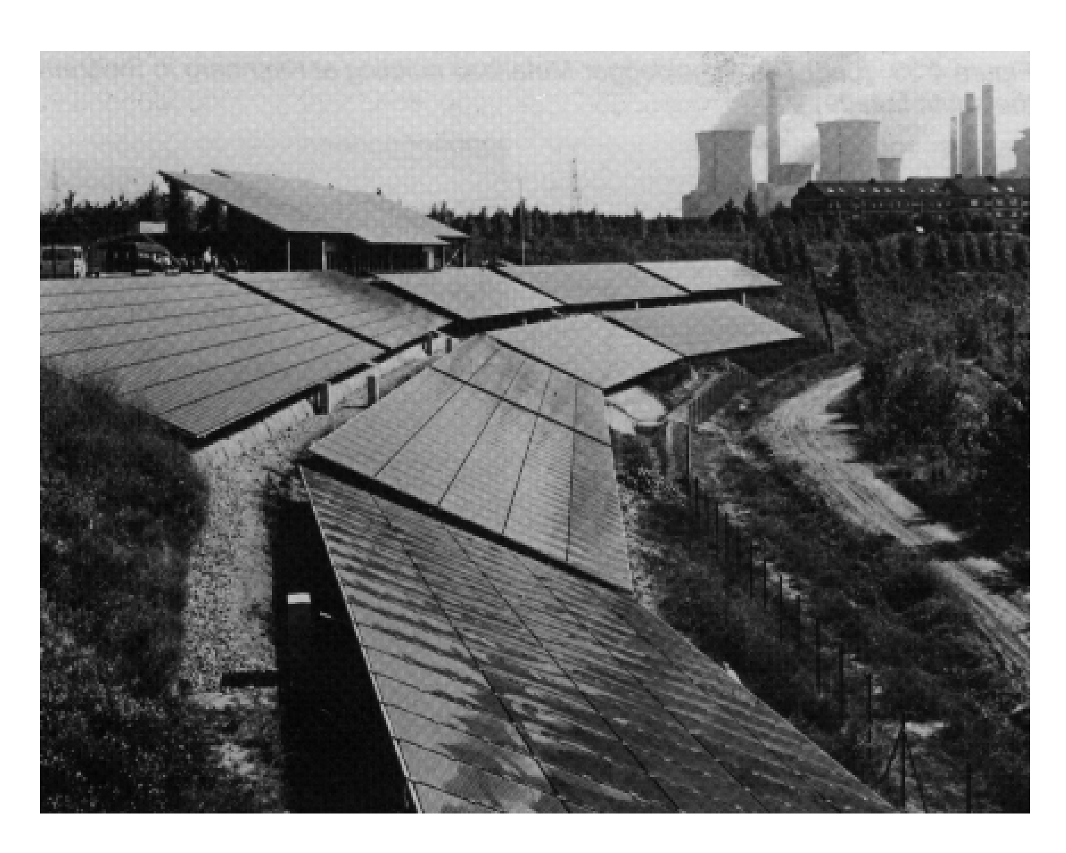
شكل (12b-3): بعض تطبيقات الخلايا الشمسية في الدول النامية

3-7-3 استخدام المنظومات الفولطاضوئية للربط مع الشبكات الكهربائية

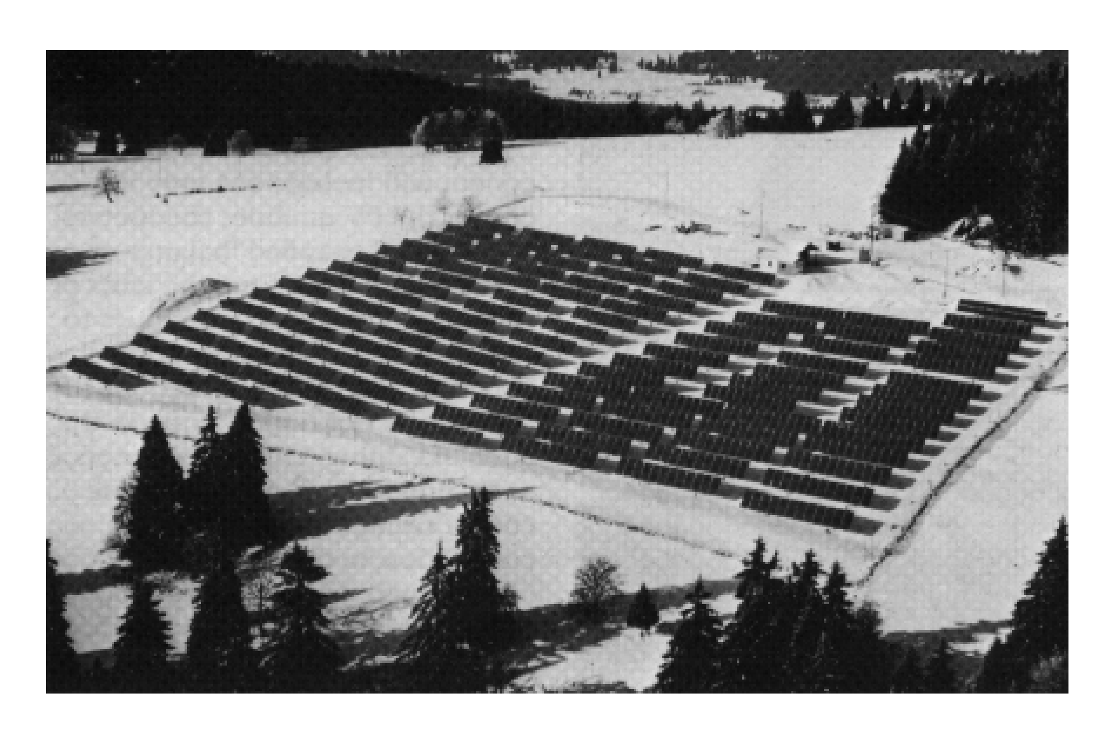
تم تشييد عدد من المنظومات الكبيرة السعة في عدد من دول العالم . نجد في أوربا إحدى أكبر المحطات التي نصبت ، وكان ذلك في عام 1988 من قِبل أكبر شركة توزيع كهربائية ألمانية (RWF) بالقرب من مدينة كويلنز على إحدى التلال القريبة من نهر موسيلي . وبلغت سعة المحطة 340 كيلو واط وبطاقة سنوية مقدارها 250000 كيلو واط – ساعة . وخضعت المحطة لمراقبة مستمرة وتم تقييم أدائها ، وعلى ضوء ذلك تم تصميم الجزء الثاني من المشروع البالغ 300 كيلو واط على ضفاف بحيرة تيورات وبدأ في العمل عام 1991 (الشكلان 13a, b-3) . كما شاركت شركة (RWF) أيضاً في تشييد محطة بقدرة 1 ميغاواط بالقرب من طليطلة في إسبانيا . وفي سويسرا تم إنشاء محطة بقدرة 500 كيلوواط ربطت بالشبكة ، كما في (الشكل 3-14) . وبلغت تكاليف المحطة 3.8 مليون جنيه إسترليني وشيدت على مساحة 20 ألف متر مربع، وتتكون من 110 مجموعات من الألواح الشمسية الأحادية البلورية من إنتاج شركة سيمنس ، سعة كل منها 5 كيلو واط وبمساحة 4574 متراً مربعاً من الخلايا لكل مجموعة. وتبلغ الطاقة السنوية للمحطة 700 ميغاواط – ساعة .



شكل (3-13a): محطة سعة 340 كيلوواط منصوبة على نهر موسيلي في ألمانيا



شكل (3-13b): محطة سعة 300 كيلوواط في ألمانيا



شكل (3-14): محطة سعة 500 كيلوواط في سويسرا

ومن البلدان الأخرى التي اهتمت باستغلال الخلايا الكهروفولطائية في إنتاج الكهرباء إيطاليا ، فقد تم نصب محطة بقدرة 300 كيلوواط بالقرب من مدينة فوجيا في جنوب إيطاليا . وقد تم توسيع المحطة إلى 600 كيلوواط عام 1991 (الشكل 3-15) . كما تم بناء محطة أخرى أكبر بسعة 3.3 ميغاواط بالقرب من مدينة نابولي الإيطالية أيضاً .



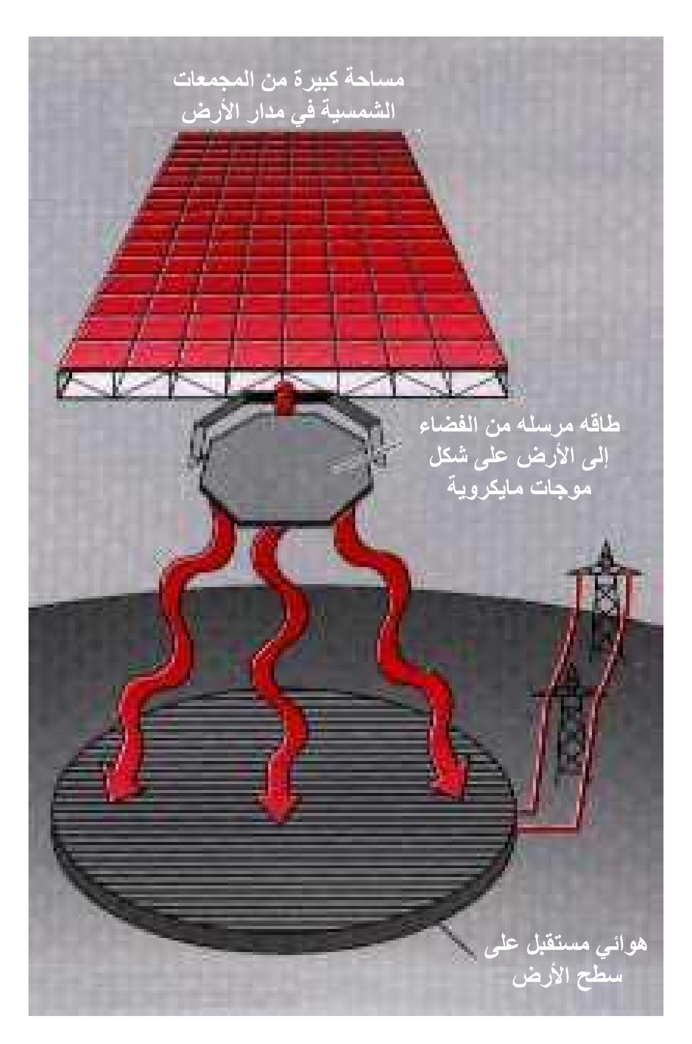
شكل (3-15): محطة بسعة 600 كيلوواط في بريطانيا

وفـي الولايـات المتحـدة تـم نـصب عـدد كبيـر مـن المحطـات ذات الـسعة العاليـة منهـا منظومتان رائدتان نصبتا في كاليفورنيا من قِبَل شركة آركو (Arco) في بداية الثمانينـات سعة الأولـى 1 ميغـاواط والثانيـة 6.5 ميغـاواط ، وقـد استخدمت كـلا المحطتين منظومـة تعقيب على محورين لتركيز الطاقة على الخلايا يعادل ضعف شدة الإشعاع، ونتيجـة لدرجـة الحـرارة العاليـة علـى الخلايـا فقـد تناقـصت كفـاءة قـسم منهـا . وقـد تـم تفكيـك المحطتـين وبيعـت أجزاؤهـا للاسـتخدام فـي منظومـات صـغيرة لمنـاطق نائيـة . وهنالـك بعض المحطات الكبيرة الأخرى التي تم نصبها في مناطق متعددة منها محطـة بسعة 1 ميغاواط تستخدم منظومة تعقيب أحادية المحور نصبت في ولايـة كاليفورنيـا ، ومحطـة أخرى نصبت في تكساس بسعة 300 كيلوواط . ونصبت أيضاً محطات عديدة فـي أنحـاء مختلفة من الولايات المتحدة بسعات تتراوح بين 200 إلى 400 كيلوواط كل منها يستخدم تقنية مختلفة من تقنيات الخلايا الفولطاضوئية . وقد تم تقديم مقترح لبنـاء محطـة بسعة 100 ميغـاواط تنـصب فـي صـحراء نيفـادا وتـستخدم المحطـة خلايـا شمـسية مـن نـوع السليكون العشوائي . وقد تم تقدير كلفة المحطة بــ 150 مليون دولار ، ويمكنهـا أن تنتج طاقة كهربائية بكلفة 5.5 سنت لكل كيلوواط – ساعة .

8-3 استخدام الخلايا الشمسية في الفضاء

تـم اقتـراح نـصب محطـة فـضائية لتوليـد الطاقـة الكهربائيـة بـسعة عـدة جيغـاواط (1 جيغـاواط = 1000 ميغـاواط = 10^9 واط) تنـصب علـى مـدار حـول الأرض وبمـساحة تعادل 30 كيلو متر مربـع . ويتم تحويل التيـار المستمر الـذي تنتجـه الخلايـا إلـى إشـعاع مايكرو ويف بذبذبة مقدارها 2.45 جيغا هيتز وتوجـه بكثافـة قـدرة مقدارها 250 واط/م^2 من1 كيلـو متـر قطـر هـوائي فـي الفضاء إلـى 100 كيلـو متـر مربـع هـوائي علـى سـطح الأرض . ويـتم بعـدها تحويـل الطاقـة المـستلمة إلـى تيـار متنـاوب ، وتـربط مـع الـشبكة (الـشكل 3-16) . ومـن مزايـا نـصب هـذه المنظومـة أن الإشـعاع الشمـسي فـي الفضاء الخارجي يصل إلى 1367 واط لكل متر مربع بدلا من 1000 واط لكل متر مربـع علـى سطح الأرض . وهذه الطاقـة متوفرة دائمـاً ، ويمكـن كذلك اختيـار هياكل واسـعة وذات متانة قليلة لانعدام الرياح ومشاكل الجو الأخـرى . ولكـن المشكلة الرئيسية التـي تواجـه نصب هذه المحطـة هي الكلفـة . لقد أجريت دراسـة فـي الولايـات المتحدة تبين منهـا أن كلفة نصب محطة تنتج 5 ميغاواط تقدر بحـوالي 15 بليـون دولار ، وهـذا المبلـغ مرتفـع

ولا يمكن أن تنفقه أغنى دول العالم إلاّ إذا آثرت التخلي عن جزء من ميزانيات الإنفاق العسكري على الأسلحة .



شكل (3-16): فكرة محطة شمسية فضائية

أسئلة تقويمية

1. ما هي مبادئ عمل الخلية الشمسية الفلطاضوئية ؟
2. ما هي المراحل التي تمر بها الطاقة الشمسية حتى تصبح طاقة كهربائية ؟
3. ما هي أنواع الخلايا الشمسية الفلطاضوئية ؟
4. ما الفرق بين الخلية الشمسية الأحادية البلورية والمتعددة البلورية ؟
5. ما الفرق بين الخلية السلكونية البلورية والخلية السلكونية العشوائية ؟
6. ما هي المواد الأخرى بالإضافة إلى السليكون التي يمكن منها إنتاج خلية شمسية ؟
7. لغرض تصميم منظومة توليد كهربائية تعمل بالخلايا الشمسية ، ما هي المتطلبات التي يجب أن تتوفر لدى المصمم لاختبار مكونات ومواصفات المنظومة ؟
8. ما هي التطبيقات الأكثر استخداماً في الوقت الحالي في مجال توليد الطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية الفلطاضوئية ؟
9. ما هي الأسباب التي تحول دون نصب محطات توليد كهربائية كبيرة السعة وربطها مع الشبكة الكهربائية ؟
10. هل يمكن نصب محطة توليد كهربائية في الفضاء الخارجي واستلام الطاقة على سطح الأرض ؟ وما هي المعوقات التي تحول دون ذلك ؟
11. ما هي التأثيرات البيئية الناتجة عن استخدام الخلايا الشمسية ؟